

Fernández García, P., *et al.*, 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la susceptibilidad en las laderas de los embalses. Aplicación a los embalses de Dañador, Guadalmena y Tranco de Beas (cuenca del Guadalquivir, España). *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538
ISSN: 0366-0176

Análisis geomorfológico para la determinación de la susceptibilidad en las laderas de los embalses. Aplicación a los embalses de Dañador, Guadalmena y Tranco de Beas (cuenca del Guadalquivir, España)

P. Fernández García⁽¹⁾, A. García de Domingo⁽²⁾ y J. Alameda Revaldería⁽³⁾

(1) Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.
E-mail: pafernand@geo.ucm.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid.
E-mail: a.garcía@igme.es

(3) Iberhidra, San Juan Bautista 36, 28230 Las Rozas, Madrid.
E-mail: jalameda@icyfsa.com

RESUMEN

El conocimiento de los factores condicionantes en la estabilidad de las laderas de los embalses, requiere un detallado estudio de los principales procesos dinámicos actuantes en el entorno del vaso. En este sentido, la cartografía geomorfológica ofrece excelentes resultados en la identificación de inestabilidades naturales y de su grado de susceptibilidad. Este trabajo estudia las características geológicas y geomorfológicas de la zona más próxima a los embalses de Dañador, Guadalmena y Tranco de Beas, todos ellos correspondientes a la cuenca hidrográfica del río Guadalquivir (provincia de Jaén). Para ello se ha realizado una cartografía geomorfológica detallada de una franja de aproximadamente 1.500 m alrededor de cada embalse, en la que se representan los principales procesos activos, así como, las formaciones superficiales. El análisis de los principales procesos geomorfológicos, en lo que respecta a su localización, características y previsible grado de actividad, ha permitido llegar a la identificación de aquellas zonas cuya seguridad pudiera verse afectada directamente a corto plazo y por tanto, también la del propio embalse. Los riesgos geomorfológicos más importantes son aquellos derivados de los movimientos de ladera (desprendimientos, deslizamientos), erosión hídrica (incisión y acarcavamientos) y procesos cársticos (subsidiencias y colapsos)

Palabras clave: embalses, riesgos geomorfológicos, cartografía geomorfológica, Cuenca del Guadalquivir, susceptibilidad

Geomorphological analysis in the assesment of slope susceptibility in reservoirs. Case studies of the Guadalquivir basin, Spain

ABSTRACT

Knowledge of conditioning factors regarding slope stability in reservoirs requires a detailed background study of the main dynamic processes acting in the surroundings of the dam. In this sense, geomorphological mapping provides excellent results in the determination of unstable slopes and their level of susceptibility. This essay analyzes the geological and geomorphological characteristics in the surroundings of Dañador, Guadalmena and Tranco de Beas reservoirs, all of them located within the basin of the Guadalquivir river. A selected area, approximately 1,500 meters wide, around each reservoir was mapped, and a detailed geological and geomorphological database was obtained for each one in which the surficial formations were represented. The analysis of the main geomorphological processes, in terms of location, characteristics and assessed level of activity, has allowed for the delimitation of those areas that could suffer changes in their safety level in the short term, thus affecting the reservoir itself. The most important ones are those derived from slope movements (rock falls, landslides), slope erosion (gullies and rills) and karstic processes (subsidence and collapses).

Key words: reservoir, geomorphological risk, geomorphological map, Guadalquivir basin, susceptibility

Introducción

Los procesos dinámicos que actúan en las laderas de un embalse, son el resultado de las características

geológicas y geomorfológicas del mismo. Estos procesos constituyen el factor preventivo principal en la detección de catástrofes naturales tan importantes como la sucedida en la presa de Vaiont en 1963

Fernández García, P., *et al.*, 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la... *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538

(Hendron y Patten, 1985). La conservación y eficacia de una presa, tiene que estar avalada por unas laderas lo más estables posible y unos valles fluviales tributarios al embalse que mantengan un equilibrio dinámico de incisión – sedimentación. Estos aspectos han motivado que en los últimos años se preste una especial atención a los procesos erosivos y de inestabilidad que tienen lugar en las laderas de los embalses (ICOLD, 2002), y que junto a las características geológicas, hidrológicas y en algún caso sísmicas, determinarían en este entorno los “previsibles” riesgos naturales.

En nuestro país son escasos los trabajos específicos sobre la estabilidad de laderas en embalses. En ocasiones han sido descritos movimientos ligados a obras de excavación, como en el caso del embalse de Urdalur (Octavio de Toledo *et al.*, 1997) o bien se han sugerido metodologías de seguimiento aplicadas a embalses peninsulares con problemas de inestabilidad, entre los que se encuentra el embalse de El Atazar (Sánchez y Soriano, 2001). En la actualidad existe una creciente sensibilidad social sobre estos temas, (Jornadas técnicas sobre estabilidad de laderas en embalses, 2007), donde se manifestó la importancia de los embalses como factor inductor en la seguridad de su entorno. Un embalse produce efectos muy diversos dentro de su contexto. Así, mientras que los procesos de inestabilidad en las laderas circundantes (deslizamientos, desprendimientos) se ven inducidos o incrementados por efecto del embalse, en los procesos fluviales correspondientes a los arroyos tributarios, tiene lugar una importante modificación en su dinámica. Esta modificación tiene lugar disminuyendo la incisión natural de los cauces, al tiempo que se produce un aumento de la sedimentación como consecuencia del frenado que sufre el arroyo a desaguar en la masa de agua del embalse. Este último hecho producirá, con el tiempo, una mayor acumulación de sedimentos al vaso y su posible colmatación.

Objetivos y metodología

Los objetivos planteados en este trabajo han sido puramente preventivos y de planificación. En este sentido, el primer objetivo sería el estudio geomorfológico e identificación de los principales procesos activos que intervienen en la evolución y seguridad de las laderas. Este estudio incluye la realización de la cartografía del inventario de los procesos actuantes en el entorno de los embalses estudiados, a una escala aproximada 1/ 15.000, así como la elaboración de la cartografía geológica de las principales formaciones

superficiales. En segundo lugar, se pretende realizar una valoración cualitativa del grado de actividad de estos procesos, a partir de los trabajos de campo efectuados y de su evolución temporal en los últimos años. Por último, se pretende establecer aquellas zonas de terreno, que bien por la ocurrencia de procesos actuales o bien por el grado de actividad de los mismos, constituyan áreas de mayor susceptibilidad a la inestabilidad.

En cuanto a la metodología, se ha realizado una revisión de la bibliografía, a partir de los mapas geológicos existentes de la serie MAGNA a escala 1: 50.000, así como la utilización de cartografías de elaboración propia. Este hecho estuvo motivado, tanto por el detalle de la escala de trabajo como por el hecho de que dos de los embalses estudiados (Dañador y Guadalmena) no tienen editada su cartografía MAGNA. El trabajo de campo realizado y la comparación de distintas fotografías aéreas (vuelos a escala 1: 17.000 del año 1977 y vuelo a escala 1:30.000 del año 2000), ha permitido la realización de la cartografía geomorfológica y de procesos activos. Posteriormente, se ha realizado una estimación cualitativa del Grado de Actividad de los procesos, a partir de la propia experiencia y del estudio secuencial de las fotografías aéreas, siguiendo los modelos basados en criterios no deterministas (Irigaray y Chacón, 2003). Así mismo, se han utilizado otros mapas complementarios, como el mapa de pendientes, con objeto de valorar este parámetro con la actividad de los procesos estudiados. Finalmente y como consecuencia del análisis cruzado de toda la información precedente, se han seleccionado y cartografiado aquellas zonas más susceptibles a presentar problemas de inestabilidad.

Los embalses estudiados han sido los de Dañador, Guadalmena y el Tranco de Beas, todos ellos situados en la cuenca alta del río Guadalquivir. Los dos primeros, se localizan en las cabeceras de los ríos Guadalén y Guadalimar, mientras que el Tranco de Beas se sitúa sobre el mismo río Guadalquivir, próximo a su nacimiento en el Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas (Fig.1a).

Situación geológica de los embalses

En la Cuenca alta del río Guadalquivir se han diferenciado tradicionalmente distintas unidades morfoestructurales que constituyen la zona de contacto entre el Macizo Ibérico y las Zonas Externas Béticas (Fig. 1b). Los embalses de Dañador y Guadalmena se sitúan sobre los materiales paleozoicos del sector más oriental del Macizo Ibérico, mientras que el embalse

Fernández García, P., et al., 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la... *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538

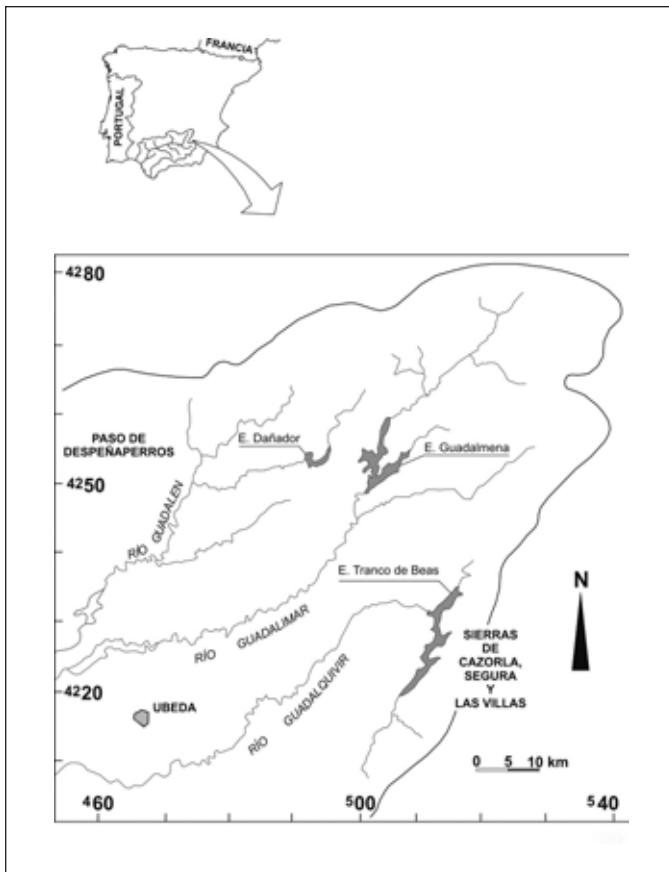


Fig.1 (a) - Situación geográfica de los embalses estudiados en la cuenca del río Guadalquivir.

Fig.1 (a) - Location of studied reservoirs in the Guadalquivir basin

del Tranco de Beas, lo hace sobre las unidades del Prebético de Cazorla y Alcaraz (Vera, 2004). Dicha unidad esta formada por sucesiones de rocas sedimentarias de edad triásica a mioceno, fuertemente deformadas, pero poco afectadas por metamorfismo.

Embalse de Dañador

El embalse de Dañador se encuentra en la provincia de Jaén, sobre el curso fluvial del río Dañador, afluente a su vez del río Guadalén. Presenta una superficie de 68 Ha, con una capacidad de embalse de 4,3 Hm³. Fue construido en 1965, y su uso principal es el abastecimiento de agua y la agricultura (MOPU, 1991)

Este embalse se localiza en las estribaciones orientales de Sierra Morena, donde el sustrato geológico pertenece en su mayor parte al Paleozoico y se encuentra afectado por un metamorfismo de grado

bajo. La franja cartografiada en este trabajo corresponde a un conjunto de pizarras (P₁) fuertemente diaclasadas, de tonos gris azulado, de probable edad silúrica, con intercalaciones de niveles de cuarcitas, de tonos claros, teñidas por óxidos de hierro y con delgados niveles de areniscas (Fig.2)

Los materiales cuaternarios se corresponden con depósitos fluviales, tanto del río Dañador como de otros cursos menores que a él confluyen, así como por suelos y alteraciones que recubren el sustrato pizarroso. Los depósitos fluviales se concentran en los fondos de valle: aluvial y fondos de valle (Q_F) y en sus márgenes adyacentes como terrazas bajas (Q_T), que no superan los 10 m de desnivel respecto al cauce. Se encuentran constituidos por limos, arenas y algún canto de naturaleza cuarcítica, con estructuras de ordenamiento fluvial y episodios de inundación (Fig.3) Otra formación superficial de interés es una alterita (Q_E), de naturaleza arcillosa y rubefactada, con niveles con edafizaciones recientes, que recubren irregularmente el sustrato. Su localización tiene lugar en el sector meridional y occidental de la franja estudiada, dando lugar a planicies de escasa pendiente con morfología de glacis (Q_G)

Embalse de Guadalmena

El embalse de Guadalmena, situado en la confluencia de los ríos Guadalmena y Herreros, se encuentra muy próximo al anterior, en el límite norte de la provincia de Jaén y sus características geológicas son muy similares. La extensión de este embalse es de 1.250 Ha, con una capacidad de agua embalsada de 346,5 Hm³, su fecha de construcción es de 1969 y su utilización se destina al abastecimiento de agua, regadío y generación de electricidad (MOPU, 1991).

La unidad cartografiada para la orla de este embalse corresponde con las pizarras azuladas de probable edad silúrica (P₁), descritas en el apartado anterior, si bien destacan un mayor número de niveles de cuarcitas (C₁), que ofrecen tramos de mayor resistencia erosiva respecto a su entorno. Otra característica para este embalse es el afloramiento, en el extremo oriental del vaso, de un granito porfiroide muy descompuesto (Fig. 2)

Los materiales cuaternarios desarrollados en esta zona son depósitos fluviales y depósitos de ladera (Fig.3). Los primeros se corresponden tanto con rellenos de los fondos de valle (Q_F), como con depósitos de terrazas medias (Q_T) situados a 10 – 15 m de altura. Litológicamente, están constituidos por arcillas, arenas y cantos aislados de naturaleza cuarcítica, salvo en la zona oriental, donde el afloramiento gra-

Fernández García, P., et al., 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la... *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538

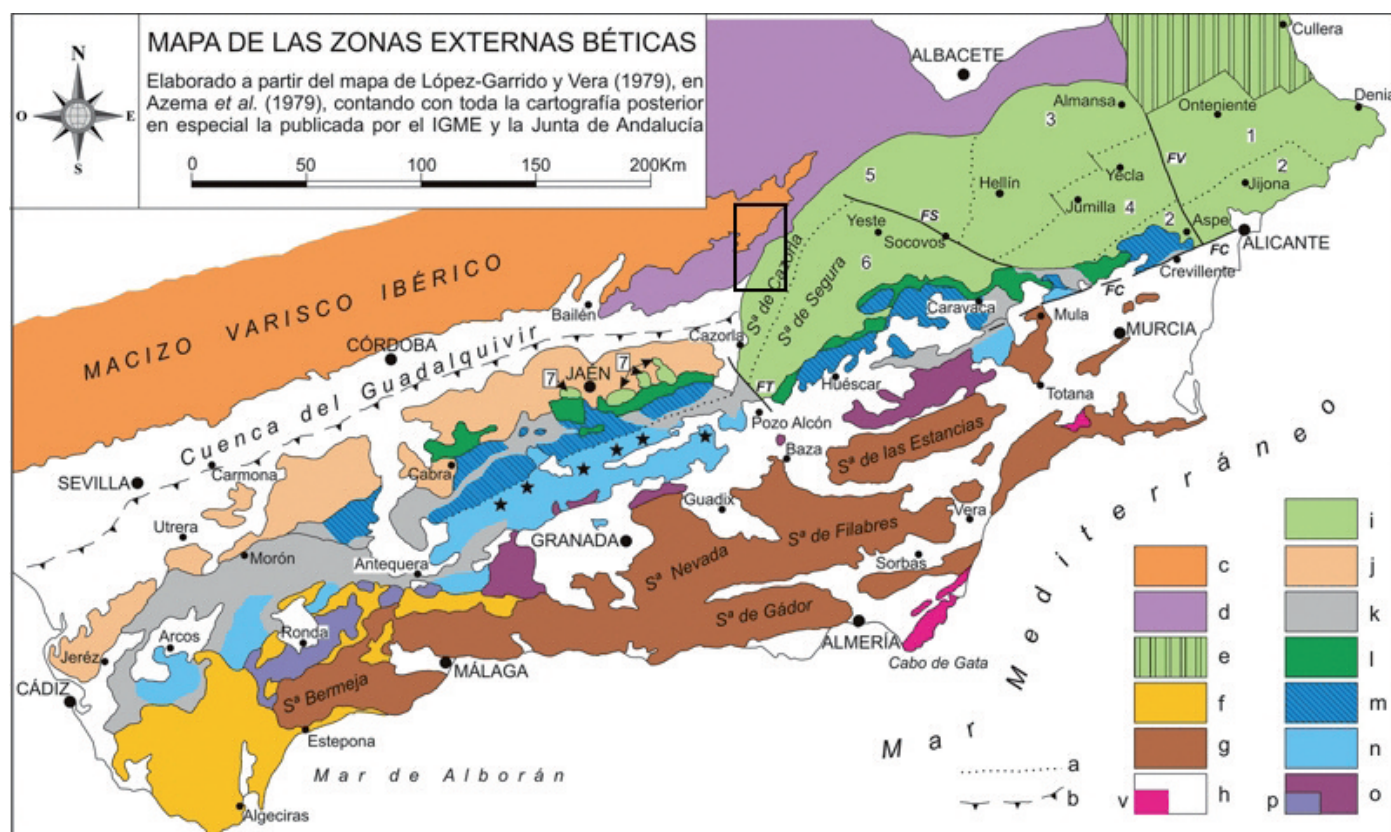


Fig. 1 (b) - Mapa Geológico de la Cordillera Bética y sus diferentes unidades (Vera y Martín Algarra, 2004).
Fig. 1 (b) - Geologic map of the Betic Range and their different zones (Vera y Martín Algarra, 2004).

nítico que atraviesa el río Herreros, aumenta la proporción de arenas y cantos de esta naturaleza. Los depósitos de ladera, corresponden a materiales coluviales (Q_c), y están constituidos básicamente por cantos angulosos de cuarcita, matriz areno-arcillosa y en ocasiones bloques. La distribución de los depósitos de ladera es irregular y discontinua, normalmente se presentan asociados a afloramientos cuarcíticos, pero llegan a formar depósitos importantes de pie de talud en algunas laderas de mayor inclinación.

Embalse del Tranco de Beas

El embalse del Tranco de Beas se sitúa en la cabecera de la cuenca hidrográfica del río Guadalquivir, represando las aguas de este río y las de su afluente por el norte: el río Hornos. Su fecha de construcción es de 1945 (MOPU, 1991), siendo el más extenso de todos los estudiados (1500 Ha) y presentando una capacidad de almacenamiento de 500 Hm³. La cola de este embalse rodea un lugar denominado “la isla”,

constituido por un afloramiento de materiales calcáreos de edad jurásica (Fig. 2) que obliga al embalse a separarse aquí en dos brazos.

Los materiales más antiguos que afloran en el entorno del embalse son de edad triásica, estando constituidos por delgados niveles de calizas tabeas de tonos grises en facies *Muschelkalk* (T_1). Estas calizas se encuentran por debajo de una importante y potente serie de arcillas y areniscas con tonos rojizos asimilados a las facies *Keuper* (T_2). Estas dos unidades cartográficas se encuentran incluidas en la Unidad estructural de Hornos-Siles (López-Garrido, 1975; Dabrio, 1975) y constituyen la mayor parte de los terrenos donde se encuentra instalado el vaso del embalse, por lo que las características geotécnicas en la parte inferior de estas laderas van a estar influenciadas por este tipo de litologías triásicas (Fig. 2).

Por encima de este conjunto, se localiza una potente serie de naturaleza carbonatada, de edad Jurásica. En la cartografía de la serie MAGNA a escala 1/ 50.000, hojas (908) y (887), llegan a diferenciarse para esta serie hasta cinco unidades diferentes, cuyas

Fernández García, P., et al., 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la... *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538

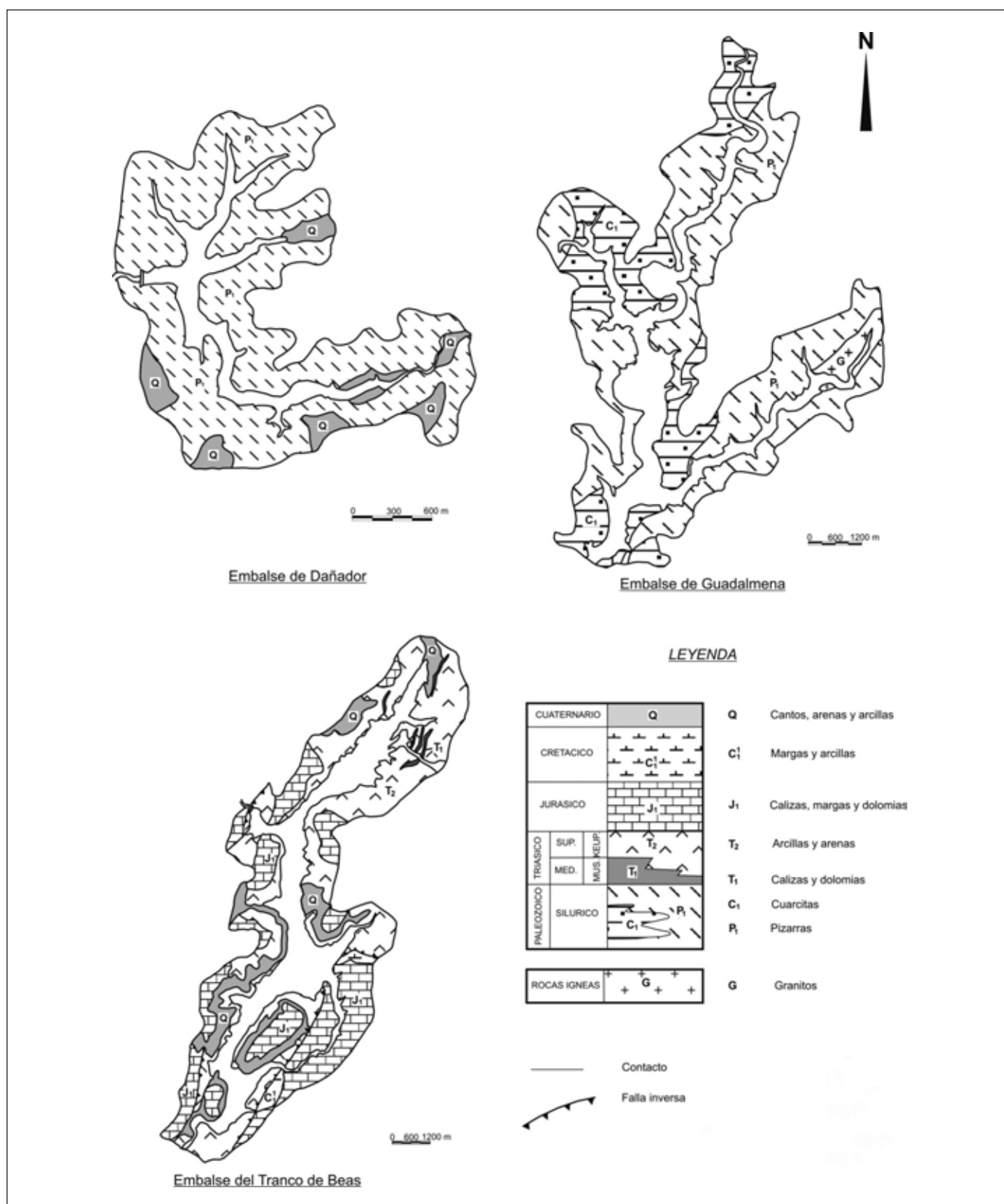


Fig. 2 - Síntesis geológica del entorno de los embalses de Dañador, Guadalmena y el Tranco de Beas.
 Fig. 2 – Geologic sketch of Dañador, Guadalmena and Tranco de Beas reservoirs surroundings

litologías varían desde calizas, calizas nodulosas, tramos margosos y dolomías (J_1), con espesores muy variables y con edades comprendidas entre el Lías y el Malm (López- Garrido 1975; Dabrio, 1975). Para finalizar, cabe señalar la presencia de materiales margosos, arenas y lutitas (C_1), que alternan con calizas de tonos grises. La edad asignada a este conjunto es Cretácico inferior y se localiza en afloramientos poco extensos en la zona oriental del vaso. Desde el punto de vista estructural puede decirse que parte del vaso de este embalse se sitúa sobre un contacto por falla inversa (Fig. 2)

El estudio de las formaciones superficiales de este embalse ha permitido diferenciar depósitos fluviales y depósitos de ladera (Fig. 3). Los primeros son, una vez más, los rellenos de los valle y arroyos que bordean el embalse (Q_F); los niveles de terrazas bajas (Q_1) que se localizan próximos al río Hornos y los conos de deyección (Q_D), relacionados sobre todo con arroyos en la margen suroriental, expuestos y a menudo vegetados, por el descenso mantenido de la lámina de agua. Todos estos elementos fluviales responden a litologías donde predominan los limos y arenas no compactados, para los depósitos de inundación, mientras que para los depósitos de terrazas se intercalan lentejones compactados de arenas, limos pardos rojizos y cantos calcáreos.

En relación a los depósitos de ladera, son los coluviones (Q_C), la unidad superficial de mayor desarrollo en este embalse, recubriendo parte de los materiales mesozoicos infrayacentes. Se disponen siguiendo franjas elongadas, al pie de las laderas, invadiendo en ocasiones directamente al agua embalsada. Los materiales son cantos e incluso bloques de distinta naturaleza, con organización por tamaños y una alta proporción de arcillas de descalcificación, procedente del sustrato.

Características geomorfológicas. Descripción de procesos activos

Las características geomorfológicas se encuentran relacionadas con la geología de los embalses descritos. En todos ellos, se reconocen procesos fluviales, procesos de inestabilidad de laderas y procesos cársticos, estos últimos sólo cuando existen litologías favorables. El estudio de los procesos geomorfológicos se basa en las observaciones de campo efectuadas y en el análisis de distintos vuelos de fotogramas aéreos, correspondiente a varios años. Así, se han comparado dos vuelos, uno de 1977, a escala 1:17.000 y otro del año 2.000, a escala aproximada 1:30.000. Aunque el intervalo de tiempo no es amplio,

sí pueden reconocerse en ambos vuelos la mayoría de los procesos estudiados, si bien existen algunos cambios morfológicos que serán expuestos en la discusión.

Procesos Fluviales

Los procesos de erosión hídrica son frecuentes en la franja que rodea a los embalses, desarrollándose con diferente intensidad según la concentración de la escorrentía superficial.

- *Arroyada laminar y regueros.* Se presentan de forma general en todos los casos estudiados, sobre todo en laderas convexas, rectilíneas y en menor medida en las cóncavas, con pendientes superiores a 20°. El problema más evidente asociado a la arroyada es la pérdida de suelo por removilización de las capas más superficiales. Estos procesos se ven favorecidos por la presencia de niveles alterados y en general, de cualquier tipo de formación superficial cuya escasa consolidación favorece su erosión, por esto son especialmente activos en el embalse de Dañador. Una mayor concentración de la escorrentía favorece la formación de regueros migratorios, rellenándose y desviando su cauce, que con el tiempo tienden a estabilizarse.
- *Incisión en arroyos tributarios.* Se refiere a la erosión de fondo que tiene lugar en los cauces que confluyen a los embalses estudiados, con o sin relleno aluvial y casi siempre con caudales muy irregulares. Son especialmente numerosos en el de Guadalmena, al tratarse de un embalse situado en la parte media de una cuenca de drenaje dendrítica, con un elevado número de cauces laterales al vaso (Fig. 3). En el embalse del Tranco de Beas algunos de estos fondos de valle pasan a formar deltas de deyección, como consecuencia de la desaceleración que sufren los sedimentos al llegar al agua embalsada.
- *Erosión en cárcavas.* Este tipo de modelado es activo en las laderas nororientales del embalse del Tranco de Beas y se desarrolla en la cabecera de los arroyos que drenan directamente al vaso, que en este lugar se encuentra constituido por el río Hornos. La morfología en cárcavas y barranqueras se ve favorecida por la litología arcillo arenosa de las facies Keuper, que suministran a este sector del embalse un relleno limoso no carbonático (Cobo, 2002). Teniendo en cuenta que el valor de la pendiente media de las cárcavas es del 16%, que la Relación de Bifurcación de la Red (Rb) es alta (5,5) y que estas formas están muy próximas al vaso

Fernández García, P., et al., 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la... *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538

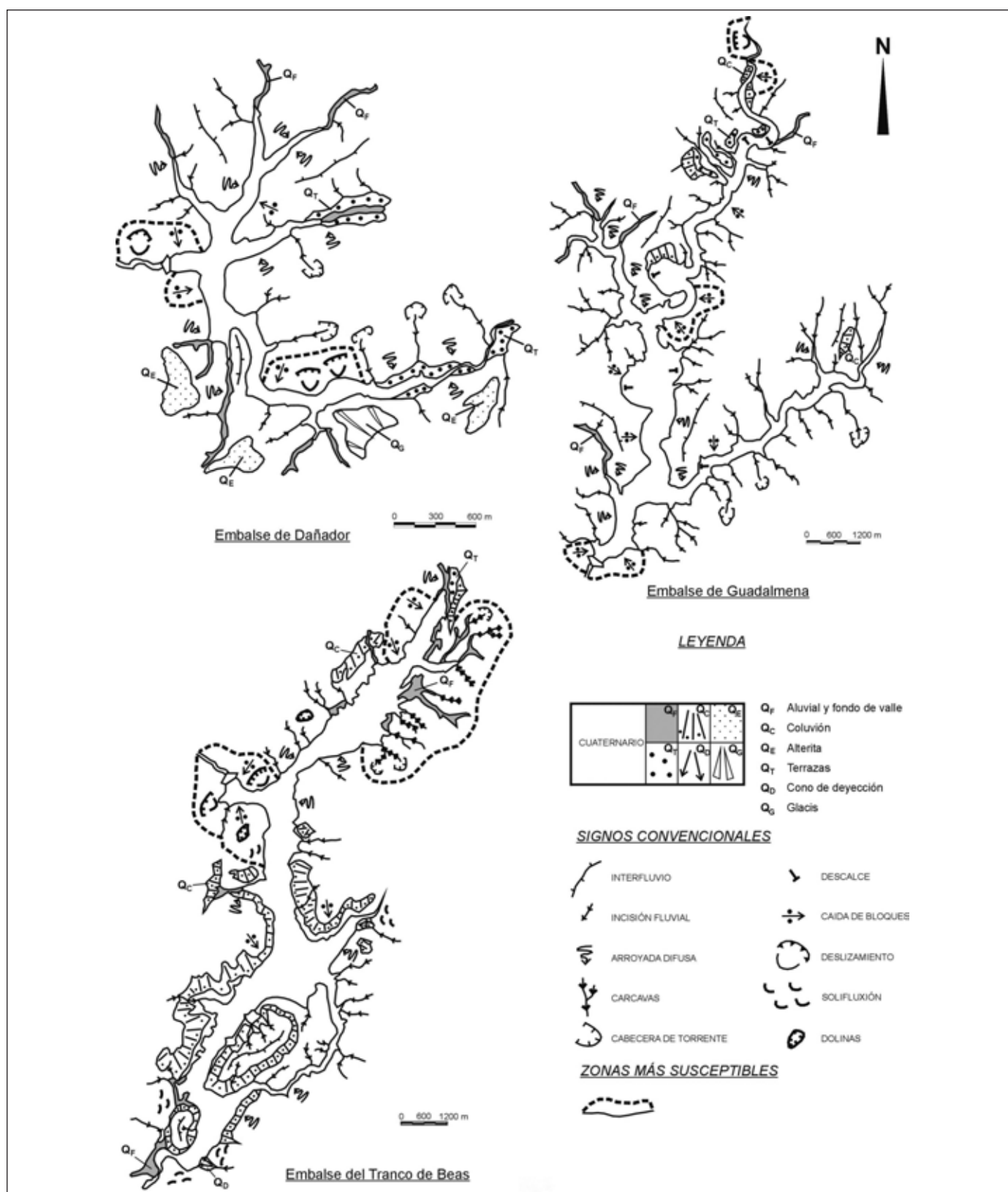


Fig. 3 - Mapa Geomorfológico y del Cuaternario correspondiente a los embalses estudiados, con indicación de las zonas más susceptibles.

Fig. 3 – Geomorphological and Quaternary map of reservoirs studied, showing susceptibility zones

Fernández García, P., *et al.*, 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la... *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538

del embalse, es esperable que los aportes de sedimentos sean elevados en esta zona (Avendaño *et al.* 1995). Este hecho se manifiesta en un mayor relleno de aluviales en torrentes y en los derrames de aluvial-coluvial sobre la misma ribera del embalse.

- *Descalce*. Se refiere a la erosión basal que tiene lugar en algunas márgenes internas de las curvaturas del embalse. El proceso se ve favorecido por la repetición de episodios de llenado y vaciado del vaso, lo que disminuye la resistencia mecánica de los materiales subyacentes. Este proceso de descalce se observa únicamente en el embalse de Guadalmena, posiblemente debido a alternancias litológicas y al trazado sinuoso del río.

Procesos de Inestabilidad de laderas

En la mayoría de los embalses se reconocen tanto rasgos erosivos (grietas, planos de despegue, escarpes) como deposicionales (lóbulos, canchales). Algunas de estas formas, por su mayor entidad, han sido descritas en la geología de cada embalse. Los tipos de movimientos de laderas descritos son:

- *Desprendimientos y caídas de bloques*. Lo presentan todos los escarpes de las laderas que bordean los embalses estudiados, pero son especialmente activos en el del Tranco de Beas y en el de Guadalmena. Se asocian con laderas rectilíneas y con inclinaciones superiores a 20°. Las rocas competentes y la presencia de fracturas subverticales favorecen la fragmentación y caída de bloques, algunos de ellos de dimensiones métricas, acumulándose en la zona inferior de las laderas (Fig. 4b) o directamente en el mismo vaso. En el embalse de Dañador algunos de estos depósitos presentan estructuras ordenadas (derrubios ordenados), favorecidas por la litología y el lavado de materiales finos. La presencia de litologías resistentes en las zonas de la cerrada de las presas hace que sean frecuentes los procesos de desprendimientos y caídas de bloques.
- *Deslizamientos*. Los deslizamientos se localizan especialmente en los embalses de Dañador y el Tranco de Beas. La mayoría de ellos son de difícil clasificación, si bien presentan una cicatriz semicircular con una longitud entre 91 y 110 m, y un lóbulo de material deslizado cuya medida oscila entre 106 y 127 m de largo. En la mayoría de los casos presentan, entre la cicatriz y la masa deslizada, una superficie suavemente cóncava de arrastre de suelo, en otros casos solo se reconocen grietas abiertas entre la coronación y la masa



Fig. 4 - (a) - Escarpe de desprendimientos en cuarcitas (embalse de Guadalmena). (b) - Cicatriz semicircular y masa desplazada (embalse del Tranco de Beas). (c) - Inclinación de árboles por reptación. Muro agrietado y con drenaje

Fig. 4 - (a) - Rock falls and cliff in quartzites (Guadalmena reservoir). (b) - Surface rupture and displacing materials (Tranco de Beas reservoir). (c) - Creeping processes and tilted trees. Cracks and drainage in the wall

Fernández García, P., *et al.*, 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la... *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538

asentada (Dañador, zona sur). La relación longitud / anchura oscila entre 1 y 0,55. La localización de los deslizamientos en las laderas es variada, reconociéndose en la parte alta de las mismas o en proximidad a la línea del escarpe lo que excluiría una relación directa con el agua embalsada y una mayor relación con la precipitación y la inclinación de las laderas.

Frecuentemente, la localización de los deslizamientos tiene lugar por debajo de determinados contactos litológicos. Así, en el embalse del Tranco de Beas, la existencia de materiales calcáreos jurásicos, sobre las arcillas del Keuper infrayacente, constituye una disposición litológica propensa a la inestabilidad. Esta inestabilidad coincidiría no tanto con el aumento de peso del agua almacenada en el acuífero calcáreo, sino con las presiones de agua altas en las arcillas del Keuper infrayacente que contribuiría así a la inestabilidad. El factor desencadenante sería una subida rápida del nivel freático hasta alcanzar un valor crítico.

Así mismo, existen numerosos deslizamientos traslacionales de pequeño tamaño, reconocidos en campo y asociados principalmente a formaciones superficiales y suelos que recubren el sustrato rocoso. Estos deslizamientos producen arrastre y deformación en los cultivos y no implican un espesor de sedimentos mayor de 2 m. Otro lugar frecuente de localización de todas estas formas descritas, es el entorno de las cerradas de las presas (Fig. 5).

- *Reptación.* Dentro de los procesos genéricos de tipo flujo, destaca en algunas laderas meridionales del embalse del Tranco de Beas la presencia de formas lobuladas e irregulares que provocan deformaciones en los suelos, árboles y una sobrepresión añadida en muros y obras civiles que provocan grietas y roturas. Se asocian con materiales arcillosos del Triásico y coluviones, capaces de saturarse en agua, sobre todo en los niveles sub-superficiales, lo que produce un movimiento diferencial en su desplazamiento. Las morfologías resultantes no presentan en cabecera ninguna marca de arranque o cicatriz, por lo que se pueden considerarse genéricamente como formas solifluídales en zonas de montaña.

Procesos Cársticos

Las formas cársticas aparecen con desarrollo irregular, presentándose únicamente en el embalse del Tranco de Beas y asociadas a los materiales calcáreos del Jurásico. En la zona de la cerrada de la presa

se han cartografiado algunas depresiones de bordes irregulares y contorno romboidal, que corresponden a dolinas y zonas de infiltración. Aunque por su altura topográfica el acuífero cárstico se encuentra colgado respecto al embalse, no ocasionando pérdidas de agua al mismo, las dolinas pueden representar posibles riesgos geomecánicos derivados de hundimientos y colapsos.

Análisis de la susceptibilidad: zonificación propuesta

A partir de la cartografía geológica y del análisis geomorfológico precedente, se elaboró el inventario y catalogación de los principales procesos actuantes en las márgenes de los vasos de los tres embalses (Tabla 1). En dicha tabla se recoge, junto a las características litológicas más importantes, una síntesis de los principales tipos de procesos, así como una estimación cualitativa del Grado de Actividad de cada proceso en cada embalse.

Para el análisis de la actividad de estos procesos se ha seguido el criterio utilizado por Copons *et al.*, 2005, consistente en considerar dos fuentes de información básicamente geomorfológicas: La primera, expresa el Grado de Preservación de los procesos y formas descritas y la segunda, alude a la presencia de los Indicadores de Actividad

El Grado de Preservación de los procesos y formas relacionadas con las inestabilidades, se refiere a la identificación, cartografía y clasificación (sí es posible) de las formas descritas. Estas formas se expresan a través de los elementos morfológicos recogidos en la correspondiente leyenda (Fig.3), tales como cicatrices de deslizamiento, lóbulos de masas despegadas, escarpes recientes y caída de bloques etc. A los procesos de incisión fluvial y escorrentía laminar, puede también asignárseles un grado de preservación, en función de la presencia o ausencia de fondos aluviales, formas de modelado en roca o erosión de suelos y vegetación por acción de la escorrentía laminar.

Los Indicadores de Actividad, se refiere a aquellos rasgos del terreno, que a escala de campo y de foto aérea, denotan la vigencia actual de las formas y constituyen una aproximación temporal de su ocurrencia. Vinculados a deformaciones recientes de la topografía y vegetación, existencia de grietas y sumideros, rezumes y encharcamientos alineados con grietas, alteraciones en los cultivos, presencia de árboles truncados y deformados, grietas en muros próximos a carreteras, etc. Estos criterios de actividad fueron asimismo utilizados en la terminología y clasificación de movimientos de ladera utilizada por WP/WLI, 1993

Fernández García, P., et al., 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la... *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538

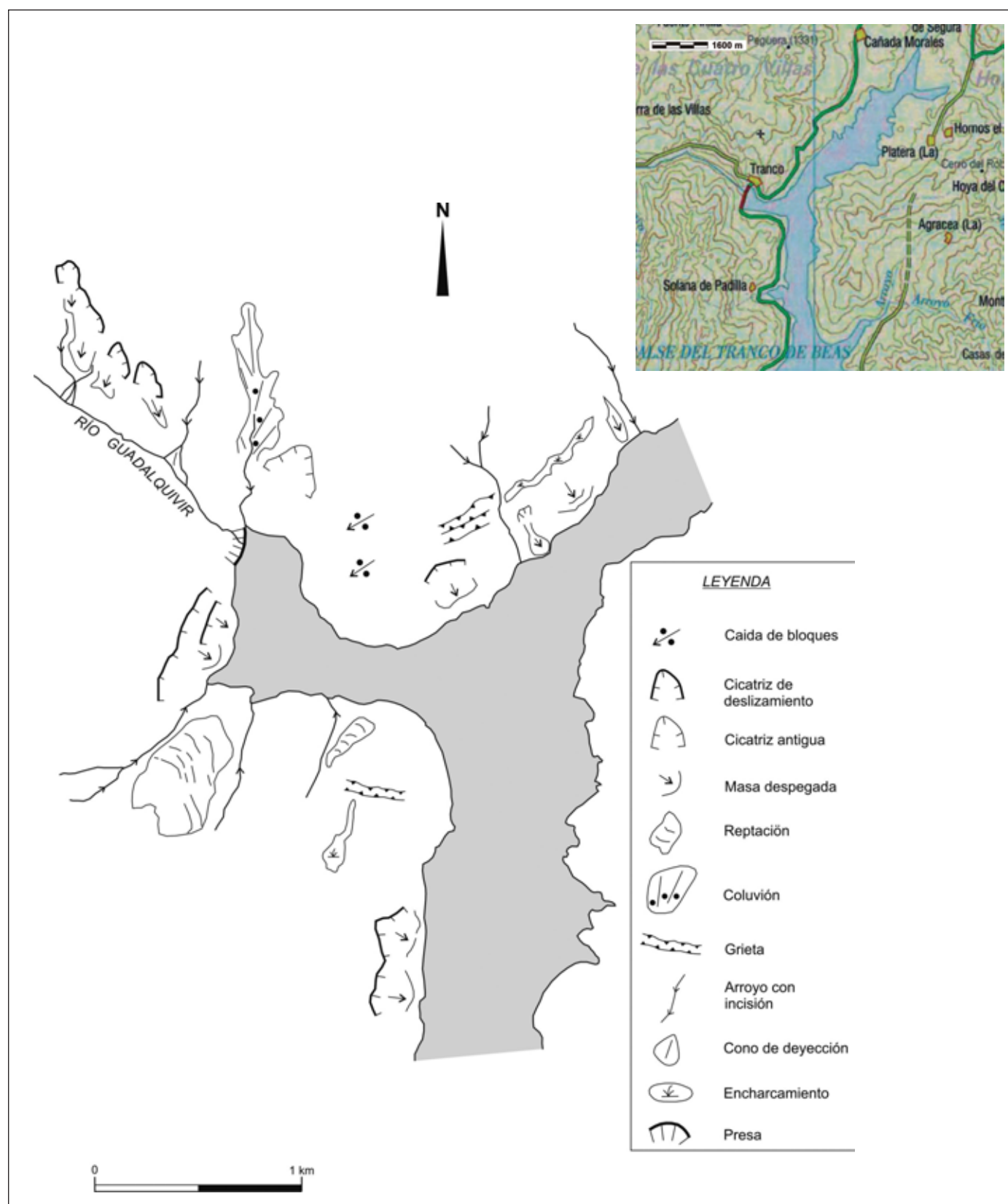


Fig. 5 - Cartografía de procesos activos en la zona de la cerrada del embalse del Tranco de Beas
 Fig. 5 - Active processes map in the Tranco de Beas dam

Fernández García, P., *et al.*, 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la... *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538

Por otro lado, la cartografía geomorfológica evidencia que la mayoría de las formas de inestabilidad de laderas y de flujo superficial, se localizan agrupadas en algunos lugares de forma preferente, lo que induce a la diferenciación de aquellas “zonas” de las laderas, que por el número de procesos que presentan y por su grado de actividad, constituyan una amenaza. Un sistema equivalente ha sido utilizado en mapas de peligrosidad por inundaciones (Barettino, 1990) y también recientemente, bajo la denominación de “zonificación” como propuesta metodológica en la estabilidad de algunos embalses (Sánchez y Soriano, 2001; Utrillas *et al.*, 2005). Para nuestro trabajo se proponen un total de once zonas susceptibles, distribuidas en los tres embalses y que han sido señaladas convenientemente en la cartografía propuesta (Fig. 3). Tres se sitúan en el embalse de Dañador y cuatro en los embalses de Guadalmena y del Tranco de Beas.

Un ejemplo detallado de la cartografía realizada para estas zonas se muestra en la Fig. 5, donde se

ilustra la zona de la cerrada del embalse del Tranco de Beas. En ella se han inventariado un total de nueve deslizamientos, de los cuales y a partir de criterios geomorfológicos, solo uno parece muy antiguo. Todos los deslizamientos constan de una cicatriz y una masa despegada. Aunque no se han llegado a diferenciar en la cartografía, los tres deslizamientos situados aguas abajo de la cerrada pueden calificarse de traslacionales, mientras que los restantes serían cóncavos, con un lóbulo deformado progresivamente según un movimiento tipo flujo, a favor de la pendiente. El tamaño estimado, que ocupan es de 544 m² para el más pequeño y de 4,13 ha para las deformaciones de flujos de derrubios. Las cicatrices de coronación se localizan preferentemente en los materiales carbonatados jurásicos, a menudo favorecidos por grietas próximas al borde el escarpe, mientras que el flujo deformado se localiza en los materiales arcillosos del Keuper (Fig. 2).

Para el estudio de las pendientes se ha utilizado la topografía digital proporcionada por la Nasa corres-

Embalse	Características Litológicas		Procesos Activos		Grado Actividad
	Sustrato	For. Superf.	Tipo	Proceso	
Dañador	Pizarras P ₁	Aluviales Terrazas Coluviones Alteritas Glacis	Fluviales	Incisión lineal	Media
				Arroyada laminar	Media - alta
			Laderas	Deslizamientos	Media – alta
				Caídas de bloques	Media
Guadalmena	Granitos G Pizarras P ₁ Cuarцитas C ₂	Aluviales Terrazas Coluviones	Fluviales	Incisión lineal	Media – alta
				Arroyada laminar	Baja – media
				Descalce	Baja
			Laderas	Deslizamientos Caídas de bloques	Baja Media
Tranco de Beas	Margas y arcillas C ₁ Dolomías y margas J ₁ Arcillas y areniscas T ₂ Calizas T ₁	Aluviales Terrazas Coluviones Conos de deyección	Fluviales	Incisión lineal	Media
				Acarcavamiento	Media – alta
				Descalce	Baja
			Laderas	Deslizamientos	Media – alta
				Caídas de bloques	Alta
				Soliflucción	Media – alta
			Kársticos	Dolinas	Media

Tabla 1 - Resumen de las principales características litológicas. Procesos activos y Grado de Actividad
Table 1 – Main lithology characteristics. Active processes and level of activity

pondiente a la zona de estudio. Del análisis de los valores de las pendientes realizado en la Fig. 6, puede deducirse que las cicatrices se sitúan, en general, en valores superiores a 17° mientras que los lóbulos deformados lo hacen en el intervalo entre 5° - 17° .

Otro movimiento de inestabilidad en esta zona detallada, se refiere a los flujos de derrubios que recubren las laderas deformándose por reptación activa (Fig. 5), y que se evidencia en suelos y vegetación. Se relacionan básicamente con materiales arcillosos del Keuper y en formaciones superficiales de tipo coluvionar. Los valores de pendiente para estas laderas se encuentran entre 5° - 17° .

Discusión de resultados y conclusiones

La idea principal en este trabajo ha sido considerar las laderas de los embalses como áreas de interés singular al presentar, en ocasiones, una alta propensión ante ciertos procesos geomorfológicos. Estos aspectos se encuentran en la actualidad insuficientemente tratados, sobre todo desde un punto de vista preventivo y de planificación. La cartografía geomorfológica y el estudio de procesos, constituyen una información básica que debe ser tratada de forma específica para cada embalse en cualquier estudio preliminar, por lo que la generalización de los resultados a otros embalses debe hacerse con cuidado. Aún así, pueden hacerse las siguientes consideraciones.

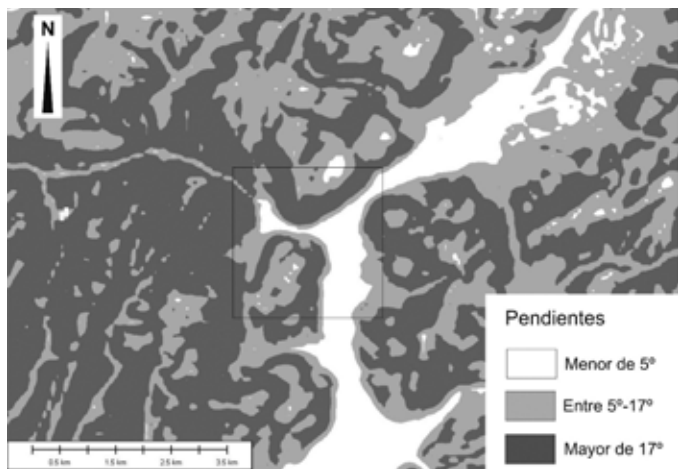


Fig. 6 - Mapa de pendientes en el entorno de la cerrada del embalse del Tranco de Beas. Pendientes $< 5^\circ$, en blanco; entre 5° - 17° , en gris claro y $> 17^\circ$, en gris oscuro. (UTM, m)

Fig. 6 – Slope gradient map in the Tranco de Beas dam. Minimum slope (white), maximum slope (black), between min. and max. slope values (gray).

La zonificación propuesta diferencia aquellos sectores en las laderas que por el número de procesos presentes y por su actividad, supongan una amenaza geomorfológica a corto y medio plazo. Para nuestra zona de trabajo se han diferenciado un total de once zonas.

Las zonas de la cerrada de las presas correspondientes a los tres embalses estudiados, destacan como lugares de actividad muy variada (Fig. 3). Los principales procesos son los deslizamientos y caídas de bloques, localizados indistintamente aguas arriba o abajo del vaso. Asimismo, en el embalse del Tranco de Beas se reconocen posibles riesgos de tipo cárstico. Los factores condicionantes que contribuirían a aumentar la peligrosidad en estas zonas de cerrada serían la presencia de litologías propensas a la saturación; la mayor pendiente de estos lugares unido al estrechamiento del cauce en este sector, así como, los inducidos por factores desencadenantes como los posibles procesos de llenado y vaciado del embalse.

De la zonificación preliminar se desprende la necesidad de realizar estudios geomorfológicos de detalle de aquellas zonas problemáticas, cuya peligrosidad se hace evidente. En este trabajo toma particular relevancia los siguientes aspectos:

Las características y el comportamiento de algunas litologías, como en el caso del embalse del Tranco de Beas, donde el peso del agua acumulada en los acuíferos calcáreos superiores, generan presiones de agua altas en las arcillas infrayacentes.

La existencia de grietas, próximas al borde del talud, cuyo aumento en número, ha sido constatado a partir de fotogramas aéreos, para un periodo de 30 años. La existencia de grietas alineadas con rezumes, encharcamientos y cicatrices de deslizamientos, constituyen un buen ejemplo de indicador de actividad.

En general todas las formas inventariadas en la cartografía de este trabajo pueden ser identificadas en los vuelos consultados, si bien se observan modificaciones en la morfología y perfil de algunas laderas, como consecuencia del abandono de tierras y deformación en cultivos en zonas con movimientos. También se destaca un aumento en el relleno de aluviales y torrenteras.

El estudio de la pendiente de las laderas, se ha hecho por tramos: menor a 5° ; entre 5° - 17° y mayor a 17° , siguiendo la Clasificación Geodinámica de Procesos (Demek, 1972) y mostrando una buena correlación con la localización de las cicatrices de deslizamientos, lóbulos deformados y laderas con reptación. Las orientaciones preferentes sur y oeste, con las que se relacionan gran parte de los movimientos en este trabajo pueden ser explicadas por el

Fernández García, P., *et al.*, 2008. Análisis geomorfológico para la determinación de la... *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4): 525-538

mayor stress hídrico ante los procesos de humectación y desecación, que en nuestro país sufren estas direcciones.

Por último, mencionar la importancia de los aspectos geomorfológicos y procesos activos en los mapas de susceptibilidad, que constituirán en un futuro una de las informaciones básicas de partida para cualquier análisis de estabilidad

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a D. Rafael Cobo y al Dr. Juan Miguel Insua sus sugerencias en la elaboración del artículo y a D. Agustín Blanco, por la ayuda prestada con la transcripción digitalizada de la información cartográfica.

Referencias

- Avendaño, C., Cobo, R., Gómez, J. L. y Sanz, M^a E. 1995. Procedimiento para evaluar la degradación específica de cuencas de embalses a partir de los sedimentos acumulados en los mismos. Aplicación al estudio de embalses españoles. *Ingeniería Civil*, 99. CEDEX. Madrid, 51-58.
- Barettino, D. 1990. Estudio de riesgos naturales en la ciudad de Alcoy. Ayala-Carcedo, J. (ed.), *Riesgo de avenidas. Serie Ingeniería Geológico Ambiental*. Zaragoza. 214.
- Cobo, R. 2002. Modelos de sedimentación en embalses. En: *Sedimentación en Embalses*, Jornadas SEPREM. Madrid, 88-101.
- Copons, R., Altimir, J., Amigó, J., Corominas, J. y Vilaplana, J.M. 2005. Metodología de estudio en zonas afectadas por grandes deslizamientos en el Principado de Andorra. *VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Valencia, 416 – 428.
- Dabrio, C.J. 1975. Santiago de La Espada (908). *Mapa Geológico de España escala 1: 50.000*. IGME
- Demek, J. 1972. Manual of Detailed Geomorphological Mapping, *Academia*, Praga, 344.
- Hendron, A.J. y Patten, F.D. 1985. The Vaiont Slide. *U.S. Corps of Engineers Technical Report*. GL-85-8.
- ICOLD. 2002. Reservoir landslides. En: *Investigation and Management*. Guidelines and case histories. Bulletin 124. <http://www.icold-cigb.net/listepublications.aspx#bull>
- Irigaray, C. y Chacón, J. 2003. Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante S.I.G. En: *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas S.I.G.* Serie Medio Ambiente nº 4. Madrid, 21-36.
- Jornadas técnicas sobre estabilidad de laderas en embalses. 2007. En: *Jornadas técnicas sobre estabilidad de laderas en embalses*. Zaragoza, 597.
- López-Garrido, A.C. 1975. Orceira (887) *Mapa Geológico de España escala 1: 50.000*. IGME
- MOPU 1991. Inventario de Presas Españolas. *Dirección General de Obras Hidráulicas. Publicaciones del Ministerio de Obras Públicas y Transportes*. Madrid, 57.
- NASA (Shuttle Radar Topography Mission), <http://hurricanes.nasa.gov/missions/>
- Octavio de Toledo, J.M., Sánchez, F.J. y Soriano, A. 1997. Movimientos de ladera en la presa de Urdalur. *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Vol. II*. Granada, 561-573.
- Sánchez, F. J. y Soriano, A. 2001. Metodología para el estudio de la estabilidad de laderas en embalses. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Vol. I*. Madrid, 87 – 98.
- Utrillas, J.L.; Joulain, Ch. y Sanchez, J.A. 2005. Metodología de la Confederación Hidrográfica del Júcar en el análisis de estabilidad de laderas de sus embalses. *VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Vol. I*. Valencia, 88 -99
- Vera, J.A. (Ed) 2004. Geología de España. *Sociedad Geológica de España. Instituto Geológico y Minero de España*. Madrid, 890
- WP/WLI (Unesco Working Party on World Landslide Inventory) 1993. A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin International Association Engineering Geology*, Nº 47, 53-57

Recibido: junio 2008

Revisado: julio 2008

Aceptado: abril 2009

Publicado: abril 2009

